

Оригинальное исследование

DOI: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-643481>

EDN: BKYBIM



Исследование сопротивлений компонентов системы электростартерного пуска автотракторных двигателей с целью выбора их оптимальных соотношений

Е.В. Волков

Тихоокеанский государственный университет, Хабаровск, Россия

АННОТАЦИЯ

Обоснование. Независимо от конструктивного совершенства любого автомобиля или трактора он не будет приведен в работоспособное состояние, если его силовую установку (в основном, мощный дизельный двигатель) не вывести из состояния покоя, т.е. прокрутить коленчатый вал с частотой не ниже минимальной пусковой, преодолевая момент сопротивления прокручиванию. Для этой цели применяют различные системы пуска и в основном электростартерного типа. Обеспечивая рабочий процесс системы электростартерного пуска (СЭСП) автотракторных двигателей, параметры и характеристики аккумуляторной батареи, стартерной цепи и стартера связаны между собой определёнными законами и нормами. Данная статья посвящена исследованию основного структурного параметра — внутреннего сопротивления компонентов СЭСП, от которого зависит выбор номинальных параметров аккумуляторной батареи и стартера.

Целью работы является проведение анализа параметров и характеристик аккумуляторной батареи и стартера в режиме низкотемпературного пуска двигателя, оказывающих существенное влияние на их внутренние сопротивления, от соотношения которых зависят массогабаритные параметры и экономические показатели основных компонентов системы электростартерного пуска.

Материалы и методы. Данное исследование является неотъемлемой частью общей методологии проектирования систем электростартерного пуска автотракторных двигателей внутреннего сгорания, основанной на синтезе фундаментальных законов электромагнитной индукции, второго Кирхгофа и теории подобия с использованием системы отнесенных единиц.

Результаты. Учитывая, что при производстве аккумуляторных батарей и стартеров используются дорогостоящие стратегические материалы — свинец и медь, запасы которых в мире весьма ограничены, правильный выбор их параметров при проектировании позволит минимизировать массогабаритные показатели и стоимость компонентов СЭСП. Для решения этой задачи в статье предложено использовать графический метод определения доли сопротивлений АБ и стартера в СЭСП с помощью треугольной системы Гиббса, что значительно проще и нагляднее вычислительной работы.

Заключение. Проблема расчётного определения основных параметров системы электростартерного пуска автотракторных двигателей в мировой практике автотракторного машиностроения до сих пор является нерешённой из-за отсутствия математического аппарата пересчёта параметров стартера в рабочей точке на номинальные условия. В данной статье приведен алгоритм её решения в части определения основных структурных параметров — сопротивлений аккумуляторной батареи и стартера при их совместной работе в этой системе с целью минимизации расхода свинца и меди при их производстве.

Ключевые слова: сопротивление аккумуляторной батареи; стартера и стартерной цепи; ёмкость аккумуляторной батареи; мощность стартера; треугольная система Гиббса.

Как цитировать:

Волков Е.В. Исследование сопротивлений компонентов системы электростартерного пуска автотракторных двигателей с целью выбора их оптимальных соотношений // Тракторы и сельскохозяйственные машины. 2025. Т. 92, № 2. С. 141–149. DOI: 10.17816/0321-4443-643481 EDN: BKYBIM

Рукопись получена: 27.12.2024

Рукопись одобрена: 29.03.2025

Опубликована online: 29.03.2025

Original Study Article

DOI: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-643481>

EDN: BKYBIM

Study of Resistance of Components of the Electric Starter System of Automotive and Tractor Engines Aimed to Selection of Their Optimal Ratios

Evgeny V. Volkov

Pacific National University, Khabarovsk, Russia

ABSTRACT

BACKGROUND: Regardless design advance of any vehicle or tractor, it cannot be ready for operation unless its power unit (mainly powerful diesel engine) is started by rotating the crankshaft with a rotation velocity no less than the minimal starting rotation velocity and overcoming rotation resistance. For this purpose, various starter systems, mostly electric starters, are used. Ensuring the working process of the electric starter system (ESS) of automotive and tractor engines, particular laws relate parameters and indicators of a battery, a starter circuit and a starter with each other. This paper covers the study of the main structural parameter: internal resistance of the ESS components, which affects on selection of nominal parameters of a battery and a starter.

AIM: Analysis of parameters and indicators of a battery and a starter in the conditions of low temperature engine start, having a significant influence of their internal resistance, ratio of which affects on weight, size and economic indicators of the main components of the electric starter system.

METHODS: This study is a part of the whole methodology of design of electric starter systems of automotive and tractor internal combustion engines, based on the synthesis of fundamental laws of electromagnetic induction; the second Kirchhoff's law and the scaling theory using the system of relative values.

RESULTS: Considering the fact that expensive strategic materials, such as lead and copper, which resources are limited in the world, are used in manufacturing of batteries and starters, the right selection of their parameters during the design process allows minimizing weight, size and cost of the ESS components. For solving this problem, the graphical method of defining of resistance ratio between a battery and a starter in the ESS using the Gibbs triangle system, which is significantly easier and clearly evident for performing calculations, is proposed in the paper.

CONCLUSION: The problem of analytical definition of main parameters of the electric starter system of automotive and tractor engines in the worldwide experience of automotive and tractor engineering is still unsolved due to absence of mathematical apparatus of recalculation of the starter parameters at the working point to the nominal conditions. The algorithm of solving this problem in the part of definition of main structural parameters, which are resistance of a battery and a starter at their combined operation in this system, to minimize lead and copper consumption during their manufacturing is given in this paper.

Keywords: resistance of a battery; a starter, and a starter circuit; battery capacity; starter power; the Gibbs triangle system.

To cite this article:

Volkov EV. Study of Resistance of Components of the Electric Starter System of Automotive and Tractor Engines Aimed to Selection of Their Optimal Ratios. *Tractors and Agricultural Machinery*. 2025;92(2):141–149. DOI: 10.17816/0321-4443-643481 EDN: BKYBIM

Submitted: 27.12.2024

Accepted: 29.03.2025

Published online: 29.03.2025

ВВЕДЕНИЕ

Исторически сложилось так, что из всего многообразие систем и способов пуска двигателей внутреннего сгорания автотракторной техники наибольшее распространение получила система электростартерного пуска (СЭСП) со стартером прямого включения, состоящая из источника электрической энергии ограниченной ёмкости — аккумуляторной батареи, электрической машины постоянного тока последовательного электромагнитного возбуждения стартера, имеющей механизм привода и электротехнические устройства для управления процессом его включения/выключения. По конструктивному исполнению, электрохимическим процессам, температурному режиму и стоимости на автотракторной технике наибольшее применение нашли АБ свинцово-кислотного типа, получившие название стартерных. Они имеют блочную конструкцию, высокую электродвижущую силу и занимают одно из ведущих мест среди других по удельной энергии и сохраняют работоспособность при стартерных разрядах до температуры $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$. При этом с понижением температуры значительно возрастает внутреннее сопротивление АБ и уменьшается отдача по энергии и ёмкости при увеличении разрядного тока, поэтому на автотракторной технике используют свинцово-кислотные батареи с энергией в 20-ти часовом режиме разряда в сотни раз превышающей энергию, необходимую для осуществления надёжного пуска двигателя при положительной температуре [1]. Это требует проведения исследований по рациональному использованию мощности (энергии) аккумуляторной батареи для обеспечения надёжного пуска автотракторных двигателей внутреннего сгорания в условиях отрицательных температур.

ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

Номинальные параметры СЭСП со стартером прямого включения для автотракторной техники во всём мире до сих пор рассчитывают по самому затратному варианту с использованием вольтамперных характеристик, т.е. через системные параметры — внутренние сопротивления АБ, стартерной цепи и стартера. В этом случае крупногабаритные и мощные аккумуляторные батареи большой номинальной ёмкости имеют достаточный запас энергии для обеспечения надёжного пуска, но при этом важное значение имеет правильное согласование соответствующих характеристик аккумуляторной батареи, стартера, стартерной цепи и двигателя. Целью исследования является системный анализ параметров рабочих процессов и характеристик их совместной работы при низкотемпературном пуске двигателя для определения основных (номинальных) параметров аккумуляторной батареи и стартера минимальной массы и стоимости.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Свинцово-кислотные аккумуляторы являются химическими источниками тока второго рода, которые могут использоваться многократно, работая в системе электро-снабжения автотракторной техники в режиме разряд-заряд, но ниже температуры $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ они практически не принимают зарядный ток и эксплуатируются разряженными до 50...60% номинальной ёмкости. При заряде они не накапливают электрическую энергию, а преобразуют её в число молекул химически активных реагентов — окислителя и восстановителя. Активным реагентом окислителя (положительной пластины) является двуокись свинца, а восстановителя (отрицательной пластины) — губчатый свинец. Электролитом является жидкое химическое соединение, имеющее хорошую ионную и малую электронную проводимость, представляющее водный раствор серной кислоты с плотностью при полностью заряженном аккумуляторе $\rho_{\text{ж}} = 1,25...1,31\text{ г/см}^3$. При эксплуатации аккумулятора в суровом климате эта плотность д.б. выше, а в тёплом — ниже.

ЭДС свинцового аккумулятора, как и любого другого химического источника тока, определяется химическими и физическими свойствами активных веществ и концентрацией их ионов в электролите и не зависит от количества заложенных в аккумуляторе активных материалов и геометрических размеров пластин. При разомкнутой внешней цепи ЭДС $E_{\text{АО}}$, представляющая собой разность его электродных потенциалов при плотности электролита $\rho_{\text{ж}} = 1,3\text{ г/см}^3$ и температуре $t_{\text{ж}} = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ равна 2,154 В. Для получения аккумуляторных батарей с ЭДС $E_{\text{БО}}$ 12 и 24 В необходимо объединять отдельные аккумуляторы в блоки с количеством последовательно соединённых аккумуляторов 6 и 12 соответственно.

Поскольку плотность электролита свинцово-кислотного аккумулятора, принимая участие в электрохимических процессах при разряде, уменьшается, следовательно, понижаются и потенциалы электродов и соответственно ЭДС. Значение ЭДС батареи $E_{\text{Б}}$ в зависимости от плотности электролита в диапазоне $1,1...1,3\text{ г/см}^3$ и температуры от $+30$ до $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ можно определить по эмпирической формуле:

$$E_{\text{Б}} = mE_{\text{А}} = m[0,84 + 0,00075(t_{\text{ж}} - 25) + \rho_{\text{ж}}'] = E_{\text{БО}} - I_{\text{Б}}R_{\text{Б}}$$

где $E_{\text{А}} = 0,84 + 0,00075(t_{\text{ж}} - 25) + \rho_{\text{ж}}'$ — ЭДС одного аккумулятора в частично разряженном состоянии, В; m — количество последовательно соединённых аккумуляторов; $\rho_{\text{ж}}'$ — плотность электролита, измеренная денсиметром при температуре, отличной от $+25\text{ }^{\circ}\text{C}$, г/см^3 ; $I_{\text{Б}}$ — разрядный ток, А; $R_{\text{Б}}$ — полное внутреннее сопротивление аккумуляторной батареи, Ом.

Разность между плотностью полностью заряженного и полностью разряженного аккумулятора составляет

0,16 г/см³, следовательно на эту величину отличается и ЭДС, поэтому по величине плотности можно судить о степени разряженности батареи. Изменение ЭДС аккумулятора от температуры незначительно и составляет около 0,00035 В/°С [2].

Напряжение аккумуляторной батареи (U_B) при разряде отличается от её ЭДС на величину падения напряжения во внутренней цепи и ЭДС поляризации и определяется зависимостью:

$$U_B = E_B - I_B R_B - E_{II}.$$

Полным внутренним сопротивлением R_B принято называть сопротивление, оказываемое прохождению постоянного (разрядного) тока:

$$R_B = R_o + R_{II}.$$

где R_o — активное (омическое) сопротивление АБ, Ом; R_{II} — сопротивление поляризации, Ом.

Омическое сопротивление батареи является суммой сопротивлений электролита $R_{эл}$, сепараторов $R_{сн}$, активной массы $R_{ам}$, решёток и соединительных элементов $R_{рс}$:

$$R_o = R_{эл} + R_{сн} + R_{ам} + R_{рс}.$$

Сопротивление электродов и токоведущих деталей, как проводников первого рода, в незначительной степени зависит от изменения температуры, а рост активного внутреннего сопротивления аккумуляторной батареи с понижением температуры связан в основном с увеличением сопротивления электролита и пропитанных электролитом сепараторов, а также сульфатацией пластин. В процессе разряда при постоянной температуре плотность электролита уменьшается, а его сопротивление, как и сопротивление сульфата свинца на пластинах — возрастает. В разряженном состоянии сопротивление батареи может достигать значения, превышающего более чем в два раза его величину до начала разряда.

Сопротивление поляризации связано с изменением электродных потенциалов при прохождении разрядного тока и зависит от разности концентраций электролита различной плотности между электродами и в порах активной массы пластин и определяется ЭДС поляризации. Не вдаваясь в теорию электрохимических процессов свинцово-кислотного аккумулятора — теорию двойной сульфатации, ЭДС поляризации можно условно разделить на два вида: химическую и концентрационную. Химическая поляризация зависит от скорости протекания электрохимических реакций взаимодействия активной массы пластин и ионов серной кислоты электролита. Концентрационная поляризация определяется скоростью диффузии ионов серной кислоты более высокой плотности в зону реакции. Сопротивление поляризации уменьшается с увеличением силы

разрядного тока, возрастает с понижением температуры и не подчиняется закону Ома [2].

Распределение сопротивлений и соответственно потерь напряжения по элементам внутренней цепи аккумуляторной батареи зависит от многих факторов. В начале стартерного разряда при температуре -18 °С сопротивление пластин и токоведущих деталей приблизительно составляет 20...30%, электролита и сепараторов — 34...48%, сопротивление поляризации — 32...45% от суммарного внутреннего сопротивления АБ. С понижением температуры доля сопротивления поляризации, электролита и сепараторов возрастает [3].

Основные параметры батареи оцениваются по временным и вольтамперным характеристикам. Вольтамперная характеристика представляет собой зависимость напряжения батареи U_B от тока разряда I_B на 5-й секунде, а временная характеристика — это зависимость напряжения от времени разряда при постоянной силе разрядного тока. Производными от этих характеристик являются мощностные зависимости, отдаваемой батареей мощности стартеру от тока или времени разряда.

Вольтамперная характеристика батареи изображается сложной кривой, имеющей квазилинейный участок в зоне от тока при напряжении $U_B = 0,4U_{БН}$ (где $U_{БН}$ — номинальное напряжение АБ, В).

Нелинейность этой характеристики объясняется нелинейностью внутреннего сопротивления АБ и, в основном, поляризационной составляющей. В этом случае использование нелинейного уравнения для расчёта вольтамперной характеристики будет усложнено излишними математическими расчётами, не приводящими к повышению точности при расчёте и анализе параметров и характеристик СЭСП, поэтому целесообразно представлять вольтамперную характеристику прямой линией, которая образуется при продолжении квазилинейного участка в обе стороны до пересечения с осями тока и напряжения, отсекающей на осях координат отрезки, пропорциональные начальному разрядному напряжению (U_{HP}) по оси ординат и току короткого замыкания ($I_{БК}$) по оси абсцисс. Эти точки являются условными и используются только для расчёта и построения вольтамперных характеристик АБ для различных условий стартерного разряда. Начальное разрядное напряжение эквивалентно ЭДС $E_{БО}$ и его можно определить с помощью вольтметра, либо *рассчитать*, а ток короткого замыкания невозможно определить экспериментально с помощью амперметра, имеющего маленькое внутреннее сопротивление, но его можно рассчитать, имея координаты какой-либо рабочей точки вольт-амперной характеристики (U_B и I_B), полученные экспериментально, по формуле:

$$I_{БК} = I_+ n_+ = U_{HP} I_B / (U_{HP} - U_B),$$

где I_+ — условный ток короткого замыкания одной пары разнополярных электродов (пластин), А;

n_+ — количество положительных электродов (пластин) в одном аккумуляторе.

При этом ЭДС поляризации E_H не учитывается из-за кратковременного режима разряда батареи при пуске двигателя. Это потому, что величина ЭДС поляризации является функцией времени протекания электрохимической реакции двойной сульфатации и для её появления необходимы минуты, что значительно больше нормированного времени разряда батареи при пуске двигателя [1, 2].

Такой подход значительно упрощает расчёт вольтамперных характеристик АБ, а, следовательно, параметров и характеристик СЭСП. Конечной целью расчёта вольтамперной характеристики таким способом является определение активного внутреннего сопротивления АБ для заданных условий по формуле:

$$R_B = U_{HP} / I_{BK} = m U_A / (I_+ n_+) = R_A m / n_+,$$

где U_A — напряжение начала разряда одного аккумулятора, В; $R_A = U_A / I_+$ — внутреннее сопротивление одной пары электродов (пластин), Ом.

В [4] приведена методика расчёта начального разрядного напряжения и тока короткого замыкания АБ для различных температур и условий стартерного разряда, по которым определяется внутреннее сопротивление АБ в заданных условиях.

Между аккумуляторной батареей и стартером находится стартерная цепь, состоящая из медного (“плюсового”) провода и “массы” двигателя и кузова (корпуса) автомобиля или трактора, следовательно напряжение, подведенное к стартеру U_C , будет меньше напряжения аккумуляторной батареи U_B на величину падения напряжения в стартерной цепи ΔU_H . При том, что сила потребляемого электростартером тока может достигать тысячи и более ампер [2], на характеристики стартерного электродвигателя это оказывает существенное влияние. В этом случае у стартера, рассчитанного на номинальное напряжение 12 В уже при номинальной мощности 5 кВт, относительные потери в стартерной цепи возрастают до 36%. Повышение номинального напряжения АБ в два раза позволяет при неизменном сопротивлении стартерной цепи R_H примерно в 4 раза уменьшить эти потери, что является одной из причин проектирования стартеров мощностью 3,5...4,0 кВт и выше на номинальное напряжение 24 В [3].

Учитывая тот факт, что медь является дорогостоящим цветным металлом, в различных странах падение напряжения в стартерной цепи определяется нормативными документами. В России принято оценивать сопротивление стартерной цепи R_H по нормированному значению падения напряжения 0,2 В на 100 А проходящего тока, поэтому её сопротивление для бензиновых и дизельных двигателей составляет 0,002 Ом и принимается постоянным (не зависящим от температуры и др. факторов) [3].

Сопротивление стартера с последовательным электромагнитным возбуждением R_C в режиме пуска

складывается из активных сопротивлений обмоток якоря и возбуждения, соединительных проводов и щеточно-коллекторного узла. Сопротивление щеточно-коллекторного узла является нелинейным и зависит от материала, плотности тока под щетками и частоты вращения якоря. При изменении нагрузки и частоты вращения в рабочей зоне стартера падение напряжения под щетками не превышает 1...2,5 В (большие значения для дизельных двигателей) и мало зависит от силы тока. В этом случае можно принять, что падение напряжения на внутреннем сопротивлении стартера от тока изменяется линейно, а сопротивление стартера при заданной температуре остаётся постоянным. Значение сопротивления стартера для номинальных условий корректируют по формуле:

$$R_{CH} = R_C / [1 + 0,004(t_{n\min} - 25)],$$

где $t_{n\min}$ — расчётная температура пуска двигателя, °С; R_C — сопротивление стартера, соответствующее этой температуре, Ом.

Существующий фундаментальный закон электромагнитной индукции, на основании которого производят расчёт номинальных параметров всех электрических машин постоянного и переменного тока промышленного и транспортного назначения, применим в определённых условиях, главное из которых — это постоянство по величине питающего напряжения (переменного или постоянного), что возможно только от источника электрической энергии “бесконечной” мощности (электростанции). Расчёт механических параметров (крутящего момента, частоты вращения якоря, мощности и сопротивления) проводят для установившихся (максимальных) рабочих режимов в совокупности с системами управления и регулирования и, как правило, положительной температуры.

Для стартеров СЭСП двигателей автотракторной и специальной техники процесс прокручивания коленчатого вала в заданных условиях не является установившимся, когда внутреннее сопротивление стартера возрастает, а напряжение АБ постоянно уменьшается. В СЭСП автотракторных двигателей батарея должна реализовывать свои энергетические свойства при отрицательных температурах и, как правило, частично разряженной и при предельных значениях разрядного тока. В этом случае рассчитанная для заданной отрицательной температуры мощность стартерного электродвигателя должна быть пересчитана на заданные номинальные условия при положительной температуре ($+25 \pm 5$ °С), при которой изготавливают на заводе стартеры и параметры которых заносят в технический паспорт, ГОСТы и др. нормативные документы. Вот здесь-то и начинаются проблемы со способами расчёта. В силу того, что ни закон электромагнитной индукции, лежащий в основе разработки электрических машин, ни другие фундаментальные законы физики не имеют температурной корректировки. В решении этой проблемы есть наработки не теоретического, но практического

(исследовательского) характера, когда в морозильной камере на тормозном стенде получают параметры рабочих характеристик уже готовой СЭСП, параметры которой изменить практически невозможно, т.к. они установлены априорно в строго формальном математическом ключе, основываясь на предыдущих исследованиях без чёткого математического анализа, методологии которого не существует до сих пор ни в России, ни за рубежом. В этом случае в своих исследованиях автор рассматривает стартер не как отдельную электрическую машину, а как элемент системы аккумуляторная батарея-стартерная цепь-стартер-двигатель с питанием от источника электрической энергии постоянного напряжения ограниченной ёмкости (мощности) с двумя уровнями: 1-й — это параметры, определённые для заданных условий пуска в повторно-кратковременном режиме в соответствии с нормативными документами и техническим заданием по температуре холодного пуска и соответствующими ей параметрами АБ, стартерной цепи, стартера и двигателя; 2-й — для номинальной (наибольшей) мощности на валу якоря стартера $P_{\text{сн max}}$. В этом случае нормируемыми параметрами АБ для первого уровня являются: предельная температура надёжного пуска — наиболее низкая температура окружающего воздуха, при которой осуществляется надёжный пуск холодного двигателя, оборудованного всеми навесными агрегатами, на основном топливе и моторном масле, при использовании штатной аккумуляторной батареи, имеющей 25%-ю степень разряженности, не более чем за две попытки продолжительностью по 10 с для бензинового и 15 с дизельного двигателей с интервалом в одну минуту.

Для второго уровня при определении номинальной мощности стартера основными (нормированными) параметрами являются: номинальная мощность $P_{\text{сн max}}$ — наибольшая мощность (кВт) на валу якоря стартера в кратковременном режиме работы при питании от аккумуляторной батареи максимально допустимой ёмкости, установленной в технических условиях на стартер, при полностью заряженной батарее, температуре электролита $+25 \pm 5^\circ\text{C}$, на первой попытке пуска двигателя, без учёта падения напряжения в стартерной цепи, которой соответствуют: сила тока $I_{\text{сн max}}$; частота вращения $n_{\text{сн max}}$; крутящий момент $M_{\text{сн max}}$; номинальное сопротивление $R_{\text{сн}}$. Напряжение на стартере в номинальном режиме обычно составляет около 75% от номинального напряжения батареи ($U_{\text{БН}}$), то есть около 9 В для батарей с номинальным напряжением 12 В и около 18 В для батарей с номинальным напряжением 24 В [3]. Это необходимо для сравнительной оценки параметров и характеристик различных стартеров. В этом случае рабочий процесс системы аккумуляторная батарея-стартерная цепь-стартер-двигатель необходимо рассматривать в соответствии со вторым законом Кирхгофа на основании уравнения баланса напряжений и ЭДС:

$$E_{\text{БО}} = I_{\text{Б}} R_{\text{Б}} + I_{\text{С}} R_{\text{С}} + I_{\text{С}} R_{\text{Ц}} + E_{\text{Я}}, \quad (1)$$

где $E_{\text{БО}}$ — электродвижущая сила аккумуляторной батареи при отсутствии разрядного тока, В; $I_{\text{Б}}$ и $R_{\text{Б}}$ — разрядный ток батареи и ток стартера в режиме пуска двигателя, А; $E_{\text{Я}}$ — противоЭДС якоря стартера, В; $I_{\text{Б}} R_{\text{Б}}$, $I_{\text{С}} R_{\text{С}}$ и $I_{\text{С}} R_{\text{Ц}}$ — падение напряжения на внутреннем сопротивлении СЭСП, В.

В режиме пуска двигателя от аккумуляторной батареи питаются кроме стартера и другие потребители электрической энергии (системы топливоподачи и зажигания, контрольно-измерительных приборов, обмотки возбуждения генератора и др.), следовательно разрядный ток АБ больше тока, потребляемого стартером, но при расчёте СЭСП принято считать $I_{\text{Б}} = I_{\text{С}}$, поэтому уравнение (1) примет вид:

$$\begin{aligned} E_{\text{БО}} &= I_{\text{С}} (R_{\text{Б}} + R_{\text{С}} + R_{\text{Ц}}) + E_{\text{Я}} = \\ &= I_{\text{С}} R_{\Sigma\text{С}} + E_{\text{Я}} \approx U_{\text{НР}} \end{aligned}, \quad (2)$$

где $R_{\Sigma\text{С}} = R_{\text{Б}} + R_{\text{С}} + R_{\text{Ц}}$ — суммарное сопротивление СЭСП, Ом.

Умножив параметры формулы (2) на ток стартера, получаем уравнение баланса мощностей:

$$\begin{aligned} P_{\text{Б}} &= E_{\text{Б}} I_{\text{С}} = I_{\text{С}}^2 R_{\text{Б}} + I_{\text{С}}^2 R_{\text{С}} + I_{\text{С}}^2 R_{\text{Ц}} + E_{\text{Я}} I_{\text{С}} = \\ &= P_{\text{ПОТ}} + P_{\text{ЭМ}}, \end{aligned}$$

где $P_{\text{Б}} = E_{\text{Б}} I_{\text{С}} \approx U_{\text{Б}} I_{\text{С}}$ — электрическая мощность АБ, Вт; $I_{\text{С}}^2 R_{\text{Б}}$, $I_{\text{С}}^2 R_{\text{С}}$ и $I_{\text{С}}^2 R_{\text{Ц}}$ — потери мощности на внутреннем сопротивлении АБ, в стартерной цепи и стартере соответственно, Вт; $P_{\text{ПОТ}}$ — суммарная мощность потерь в АБ, стартерной цепи и стартере, Вт; $P_{\text{ЭМ}} = E_{\text{Я}} I_{\text{С}}$ — электромагнитная мощность стартера, Вт.

Мощность на валу якоря стартерного электродвигателя $P_{\text{С}}$ эквивалентна мощности сопротивления прокручиванию коленчатого вала двигателя с учётом потерь в приводе и определяется зависимостью $P_{\text{С}} = P_{\text{ЭМ}} \eta_{\text{ЭМ}}$ (где $\eta_{\text{ЭМ}}$ — электромагнитный КПД стартера, который находится для стартеров различной мощности в диапазоне 0,86...0,95). Потери мощности в стартере $I_{\text{С}}^2 R_{\text{С}}$ делят на механические, электрические и магнитные, которые оценивают КПД стартерного электродвигателя, максимальное значение которого составляет 0,5...0,6.

Мощность (энергия) потерь внутри АБ $I_{\text{С}}^2 R_{\text{Б}}$ при разряде расходуется на “джоулево” тепло (нагрев), разложение воды электролита на атомарные кислород и водород, саморазряд и поляризацию и составляет 32...44%.

В диапазоне рабочих токов стартера, когда в цепи якоря действует противоЭДС $E_{\text{Я}}$, к плюсовой клемме стартера подводится напряжение:

$$U_{\text{С}} = I_{\text{С}} R_{\text{С}} + E_{\text{Я}} = U_{\text{НР}} - I_{\text{С}} (R_{\text{Б}} + R_{\text{Ц}}),$$

Это напряжение не постоянно и имеет минимум $U_{\text{СТТ}}$ в момент начала прокручивания коленчатого вала двигателя, т.е. при подключении стартера к АБ, когда ток

стартера имеет максимальное (тормозное) значение I_{CT} ([6], рис. 2):

$$U_{CTT} = I_{CT} R_C = U_{HP} - I_{CT} (R_B + R_{II}) = \\ = U_{HP} \left[1 - (R_B + R_{II}) / R_{\Sigma C} \right],$$

где $I_{CT} = U_{HP} / R_{\Sigma C}$ — ток полного торможения стартера, А.

Тогда сопротивление стартера определяется зависимостью $R_C = U_{CTT} / I_{CT}$.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

При проектировании СЭСП стремятся получить сбалансированные номинальные параметры аккумуляторной батареи и стартера в зависимости от решаемой задачи, для чего необходимо соблюсти условие [3]:

$$R_B / R_{\Sigma C} + R_C / R_{\Sigma C} + R_{II} / R_{\Sigma C} = \\ = (R_B + R_{II} + R_C) / R_{\Sigma C} = 1$$

Решая это уравнение относительно доли каждого сопротивления, получаем:

- для АБ

$$B = R_B / R_{\Sigma C} = R_B / (R_B + R_C + R_{II}); \quad (3)$$

- для электродвигателя стартера

$$\mathcal{E} = R_{II} / R_{\Sigma \mathcal{E}} = R_{II} / (R_B + R_{II} + R_{II}); \quad (4)$$

- для стартерной цепи

$$\mathcal{I} = R_C / R_{\Sigma \mathcal{I}} = R_C / (R_B + R_{II} + R_{II}), \quad (5)$$

где Б, Э и Ц — безразмерные доли сопротивлений соответственно аккумуляторной батареи, электродвигателя стартера и стартерной цепи по отношению к суммарному сопротивлению СЭСП для заданных условий пуска.

Увеличение доли одного из компонентов в суммарном сопротивлении СЭСП позволяет уменьшить её габаритные размеры и массу, но при этом неизбежно ухудшаются те же показатели у другого компонента. Это касается только АБ и стартера, т.к. сопротивление стартерной цепи $R_{II} = (R_B + R_C) \mathcal{I} / (1 - \mathcal{I}) = 0,002 \text{ Ом} = \text{const}$.

Представляя полученные выражения (3...5) обратными зависимостями, запишем:

- для АБ $1 / B = R_{\Sigma C} / R_B = 1 + (R_C + R_{II}) / R_B$;
- для стартера $1 / \mathcal{E} = R_{\Sigma C} / R_{II} = 1 + (R_B + R_C) / R_{II}$;
- для стартерной цепи $1 / \mathcal{I} = R_{\Sigma C} / R_C = 1 + (R_B + R_C) / R_C$.

В итоге получаем зависимости для определения сопротивления АБ, если известно сопротивление стартера и наоборот:

- для АБ $R_B = (R_C + R_{II}) B / (1 - B)$;
- для стартера $R_C = (R_B + R_{II}) \mathcal{E} / (1 - \mathcal{E})$.

Полученные зависимости (3...5) имеют линейный характер, только положительные значения и могут быть использованы для построения треугольной системы координат (рис. 1, а), определяющей их взаимосвязи [6].

Для этого необходимо:

1. Каждую из зависимостей (прямых линий) принять за одну из осей координат: $CB = f(B)$, $BA = f(\mathcal{E})$ и $AC = f(\mathcal{I})$.
2. Точку пересечения каждой зависимости (прямой) с двумя другими, принимая положительным движение по часовой стрелке, считать началом этой оси. При этом очевидно, что каждая точка пересечения сторон треугольной шкалы А, В или С является началом своей оси координат.
3. Каждая точка, расположенная в треугольной системе координат, имеет три координаты, сумма которых равна параметру треугольной системы. Положение каждой из них определяется длиной отрезка оси, отсекаемого от начала координат соответствующей прямой, проведенной параллельно предыдущему значению параметра координатной сетки, считая направление вращения по часовой стрелке.
4. Одинаковое число делений, на которые делят все стороны треугольника, называется параметром

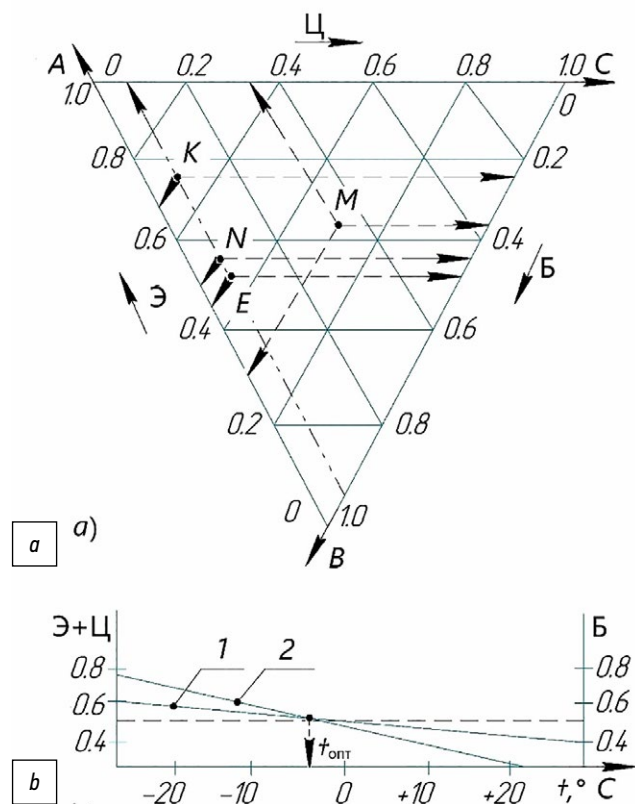


Рис. 1. Треугольная система координат с равномерными шкалами (а) и номограмма распределения сопротивлений в зависимости от температуры (б).

Fig. 1. The triangular coordinate frame with uniform scales (a) and the nomographic chart of resistance distribution depending on temperature (b).

треугольной системы. Параметр всегда число целое и положительное. На практике его часто принимают равным ста процентам, либо другим безразмерным числам, кратным 10 в любой степени. Положение всякой точки в треугольной системе координат определяется любой парой координат, но между всеми тремя координатами каждой точки существует зависимость: алгебраическая сумма трёх координат для каждой точки данной системы координат есть величина постоянная и равная параметру системы, т.е. $B + Z + C = 1, 10, 100$ и т.д.

5. Стороны образовавшегося треугольника делятся на любое одинаковое число частей, где часть каждой стороны, принятая за единицу, является модулем шкалы (оси), совпадающей с этой осью.

В общем случае треугольная система координат, построенная при пересечении трёх произвольных прямых, базисом которой является равносторонний треугольник с углом между осями 60° , называется равносторонней и её построение значительно упрощается. Если параметр такой системы равен 100% (единице) и ограничивается только базисом, а через деления шкал сторон треугольника проведены прямые, параллельные двум другим сторонам треугольника, то получаем треугольную сетку, которую называют треугольниками Гиббса. Каждая точка, расположенная на какой-либо из сторон треугольной системы Гиббса, имеет одну координату, равную нулю. Это будет та координата, через значение нуль шкалы которой проходит сторона треугольника с заданной точкой. Точка М внутри треугольника имеет следующие координаты: $B = 0,37$, $Z = 0,35$ и $C = 0,28$.

В случае применения треугольной системы Гиббса для анализа сопротивлений компонентов СЭСП, когда сопротивление стартерной цепи имеет постоянное значение независимо от температуры, все точки, расположенные на прямой, параллельной оси треугольника АВ (пунктирная линия) имеют одну координату, которую эта прямая отсекает на стороне треугольника, считая по направлению движения часовой стрелки от стороны треугольника, которой прямая параллельна. На рис. 1, а точки N и K, расположенные на одной прямой, параллельной стороне АВ, имеют координаты этих точек по параметру $C = 0,07$: для точки N: $B = 0,45$, $Z = 0,48$; для точки K: $B = 0,23$, $Z = 0,70$. Такое распределение долей сопротивлений зависит от режима, в котором работает стартер при низкотемпературном пуске двигателя — сбалансированном (прямая 1 на рис. 1, б) и при использовании АБ повышенной ёмкости (прямая 2 на рис. 1, б). На этом графике указана оптимальная температура t_{opt} , ниже которой могут возникать проблемы с пуском двигателя.

В идеальном варианте при расчётной температуре холодного пуска максимальную мощность АБ отдаёт при равенстве сопротивлений внешней и внутренней цепей, т.е. когда $B = 0,5$, $Z = 0,43$ и $C = 0,07$ (пунктирная прямая линия на рис. 1, б и точка Е на рис. 1, а). По величине

сопротивления АБ при нормированном сопротивлении стартерной цепи определяют её номинальную ёмкость, а по сопротивлению стартера — его номинальную мощность, что является задачей оптимизации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной статье впервые обращено внимание разработчиков автотракторной техники на один из важнейших структурных параметров — внутреннее сопротивление компонентов СЭСП, т. к. от их значений зависит номинальная ёмкость аккумуляторной батареи и номинальная мощность стартера, а также их масса, габаритные размеры и стоимость. Практикой создания СЭСП установлено, что эти параметры АБ и стартера находятся в обратно-пропорциональной зависимости от их сопротивлений. Процесс включения стартера является кратковременным и составляет очень малую долю от продолжительности работы двигателя, а «возить» большую массу АБ и стартера на автомобиле, помимо всего прочего, по крайней мере затратно. Так, например, стартер автомобиля КАМАЗ типа СТ142-Б имеет массу 28 кг, а две АБ 6СТ-190 ТР весят около 140 кг, из которых на медь приходится около 14 кг, а на свинец — более 100 кг. Для экономии свинца и меди были определены параметры и конструкция СЭСП со стартером другого принципа действия и с более высоким внутренним сопротивлением — электроинерционного типа мощностью 1,4 кВт примерно такой же массы и АБ номинальной ёмкостью 26 А·ч, номинальным напряжением 24 В и массой около 15 кг, что более чем в 10 раз меньше, чем у стартера традиционной конструкции [7]. При этом на изготовление высокооборотного стартера с частотой вращения 14000 мин^{-1} потребуется в 3...4 раза меньше меди. При годовом выпуске только автомобилей КАМАЗ 150 000 единиц экономический эффект на экономии только свинца составит около 3 млрд руб.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Вклад автора. Автор утверждает о единоличном (без соавторов) участии в разработке темы данной статьи, которая является составной частью комплексного исследования, оформляемого в виде докторской диссертации на тему: «Методологические основы проектирования систем электростартерного пуска автотракторных двигателей внутреннего сгорания». Автор одобрил рукопись (версию для публикации), а также согласился нести ответственность за все аспекты работы, гарантируя надлежащее рассмотрение и решение вопросов, связанных с точностью и добросовестностью любой её части.

Этическая экспертиза. Неприменимо.

Источники финансирования. Отсутствуют.

Раскрытие интересов. Автор заявляет об отсутствии отношений, деятельности и интересов за последние три года, связанных с третьими лицами (коммерческими и некоммерческими), интересы которых могут быть затронуты содержанием статьи.

Оригинальность. При создании настоящей работы авторы не использовали ранее опубликованные сведения (текст, иллюстрации, данные). Доступ к данным. Редакционная политика в отношении совместного использования данных к настоящей работе не применима, новые данные не собирали и не создавали.

Генеративный искусственный интеллект. При создании настоящей статьи технологии генеративного искусственного интеллекта не использовали.

Рассмотрение и рецензирование. Настоящая работа подана в журнал в инициативном порядке и рассмотрена по обычной процедуре. В рецензировании участвовали два внешних рецензента, член редакционной коллегии и научный редактор издания.

ADDITIONAL INFORMATION

Author contribution: The author claims sole (without co-authors) participation in the development of the topic of this article, which is an integral part of a comprehensive study, which is being formulated in the form of a doctoral dissertation on the topic: "Methodological foundations of designing electric starter start systems for automotive

internal combustion engines." Thereby, the author made a substantial contribution to the conception of the work, acquisition, analysis, interpretation of data for the work, drafting and revising the work, final approval of the version to be published and agrees to be accountable for all aspects of the work.

Ethics approval: Not applicable.

Funding sources: No funding.

Disclosure of interests: The authors have no relationships, activities or interests for the last three years related with for-profit or non-profit third parties whose interests may be affected by the content of the article.

Statement of originality: In creating this work, the author did not use previously published information (text, illustrations, data).

Data availability statement: Editor's policy in terms of collective use of data is not applicable to this paper, any new data are neither collected nor created. Generative AI: Generative AI technologies were not used for this article creation.

Provenance and peer-review: The paper was submitted to the journal in a proactive way and was reviewed according to the standard procedure. Two external reviewers, a member of the editorial board and the scientific editor of the journal took part in the review.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ | REFERENCES

1. Chizhkov YuP, Kvayt SM, Smetnev NN. *Electric starter start of tractor engines*. Moscow: Mashinostroenie; 1985. (In Russ.)
2. Yutt VE. *Electrical equipment of cars*. Moscow: Transport; 1989. (In Russ.)
3. Kvayt SM, Mendelevich YaA, Chizhkov YuP. *Starting qualities and starting systems of automotive engines*. Moscow: Mashinostroenie; 1990. (In Russ.)

4. Volkov EV. Calculation of the discharge characteristics of a lead-acid battery in the engine start mode. *Automotive Industry*. 2023;6:12–15. (In Russ.) EDN: FFNUIP
5. Volkov EV. Electromechanical and mechanical characteristics of the starter in the car engine start mode. *Truck*. 2024;8:13–17. (In Russ.) doi: 10.36652/1684-1298-2024-8-17-22 EDN: EJKUTA
6. Bloch LS. *Practical nomography*. Moscow: Vyschaya shkola; 1971. (In Russ.)

ОБ АВТОРЕ

Волков Евгений Владимирович,
канд. техн. наук,
доцент высшей школы транспортных систем и технологий;
адрес: Россия, 680035, Хабаровск, ул. Тихоокеанская, д. 136;
ORCID: 0009-0002-3535-6130;
eLibrary SPIN: 3748-8125;
e-mail: 375199@mail.ru

AUTHOR'S INFO

Evgeniy V. Volkov,
Cand. Sci. (Engineering),
Assistant Professor of the Higher School of Transport Systems
and Technologies;
address: 136 Tikhookeanskaya st, Khabarovsk, Russia, 680035;
ORCID: 0009-0002-3535-6130;
eLibrary SPIN: 3748-8125;
e-mail: 375199@mail.ru